草食畜牧业乳肉功能性产品发展的战略思考

贺志雄[1,2] 周传社[1,2] 王 敏[1] 杨 果[3] 钟荣珍[4] 焦金真[1] 汤少勋[1] 谭支良[1,2*]

1 中国科学院亚热带农业生态研究所 中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室 长沙 410125
2 中国科学院大学 现代农业科学学院 北京 100049
3 中国科学院西北生态环境资源研究所 兰州 730000
4 中国科学院东北地理与农业生态研究所 吉林省草地畜牧重点实验室 长春 130102

摘要 我国畜牧业历经40余年快速增长，科技创新要素和全面小康社会新发展理念“双轮驱动”畜牧业步入由数量规模型向质量安全型转型发展的新阶段。发展动物功能性产品是畜牧业转型升级和高质量发展的重要突破口。文章在分析国内畜牧业行业和国内外草食畜牧业功能性动物产品发展现状的基础上，剖析了我国草食畜牧业乳肉功能性产品研究的前沿科学和技术问题，同时围绕生物技术（遗传改良与生物合成）和非生物技术（饲养管理）对目前草食家畜乳肉功能性产品研发方面的实践探索做了简要介绍；以期在国家相关产业发展战略层面，针对不同生态区域特点和消费需求，加大草食畜牧业高质量转型和乳肉功能性产品研发与产业化的支持力度，不断务实草食畜牧业乳肉功能性产品调控理论和技术。唯如此则对于引导草食畜牧业可持续发展和消费者健康膳食，以及我国畜牧业新发展格局形成具有重要的战略意义。

关键词 草食畜牧业，功能性产品，乳肉品牌，实践探索

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210407004

自20世纪以来，全球人口普遍出现了由于营养过剩而引起的“富贵病”，如糖尿病、心脑血管疾病等，继而引发功能性食品的概念。2017年，十九大报告提出“健康中国”发展战略。在大健康战略背景下，发展集营养和健康为一体的功能性动物产品，不仅是驱动畜牧业供给侧改革逐步形成高质量发展的产业新格局的有力抓手，而且是助力健康中国战略落地的重要途径。2020—2035年，我国在全面建成小康社

*通信作者

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA26040300、XDA26050102），中国科学院科技服务网络计划（STS）（KFJ-STS-ZDTP-075）

修改稿收到日期：2021年5月27日

会、实现第一个百年奋斗目标后，将向第二个百年奋斗目标进军。全社会对健康产品的需求日益多元化、差异化和个性化，肉、蛋、奶等动物性产品在我国居民膳食结构中的消费量逐年增加，人们对动物产品质量的要求将愈发迫切。未来 15 年，我国中等收入群体规模预计将从 4 亿人增长到 8 亿人[1]。强大的内生市场需求在牵引产品产量增加的同时，也将促进高质量功能性动物产品的生产和发展，以满足中等收入群体的消费需求。

为满足我国 14 亿人口对肉、蛋、奶等动物性产品的刚性需求，我国畜牧业过去 40 年来数量型增长成就斐然。目前，我国饲养着全世界 1/2 的猪、1/3 的家禽、1/5 的羊和 1/11 的牛，畜牧业生产规模居世界前列[2]。一方面，我国草食畜牧业发展潜力巨大。统计数据显示，2019 年我国全年肉产量 7 759 万吨，其中猪肉产量 4 255 万吨，牛肉产量 667 万吨，羊肉产量 487 万吨，禽肉产量 1 897 万吨；同时，禽蛋产量 3 309 万吨，牛奶产量 3 298 万吨[3]。与我国居民肉类消费结构进行对比，耗粮型猪禽肉占比为 79%，而食草性牛羊肉仅占 15%。耗粮型猪禽占比扭曲不仅反映出我国畜牧业产业结构严重不合理，而且与我国自然资源禀赋和种植业副产物资源（拥有约 4 亿公顷的草原，面积位列全世界第一，每年农作物秸秆约 8 亿吨）不相匹配。与草食畜牧业发达国家相比较（例如，新西兰和澳大利亚食草性牛羊肉分别占比 79% 和 65%①），我国草食畜牧业发展潜力巨大。另一方面，面对新发展阶段、新发展理念和新发展格局框架下我国农业的发展趋势，我国草食畜牧业发展走高质量转型发展道路也是必然趋势。功能农业将是继高产农业、绿色农业之后第三个发展阶段，功能性农产品被认为是未来高端食品的发展方向[4]。当前，我国部分畜产品出现结构性相对过剩：一般性同质化产品量大价低，高品质产品供给无法满足消费需求。以奶牛为例，消费者对国产乳制品消费信心不足，伴随着奶粉进口量大幅度增长，国内生鲜乳供需严重失衡。因此，发展草食畜牧业国产乳肉功能性产品，不仅是草食畜牧业高质量发展的首要任务，还是重塑民族品牌、让消费者重拾信心的新突破口，更是推动我国畜牧业进入世界先进行列的必由之路。

1 国内外功能性动物产品发展现状

功能性动物产品是以动物产品为原料的一类功能性食品。功能性食品除了具有营养和感官功能等食品的基本属性外，还可在增强机体免疫功能、预防疾病、增强体质及调节机体功能等方面对人体健康起积极作用。功能性食品发展大体分 3 个阶段：第一阶段的功能性食品主要是各类强化食品，是没有经过任何实验予以验证的最原始功能性食品，我国的多数功能性食品均属于此类；第二阶段功能性食品，经过人体或动物试验证明它具有某项生理调节功能；第三阶段功能性食品主要体现在对功能成分研究透彻，即在第二阶段功能性食品基础上，同时明确功能因子的结构、含量及其作用机制，且功能因子具有稳定的形态。目前，欧美等发达国家功能性食品研发基本处于第三阶段。

现阶段国内研发的功能性农产品主要表现为第一阶段特征的富含矿物元素（如硒、钙、锌等）食品。功能性鸡蛋是研究较多的一类动物性产品。例如，富硒鸡蛋是使用无机硒或有机硒等含硒量较高的饲料饲喂蛋鸡，使硒在鸡体内转化为有机硒并沉积在鸡蛋中。人体对鸡蛋中有机硒的吸收率高达 80%，可见富硒鸡蛋是较好的硒营养补充剂。另外，通过蛋鸡饲料对鸡蛋内胆固醇、脂肪酸、磷脂、氨基酸、矿物质、维生素和类胡萝卜素等含量进行调控，生产符合儿

① FAO. Livestock Primary. (2020-12-22). http://www.fao.org/faostat/en/#data/QL.

童、老人等人群饮食营养需求的功能鸡蛋也有大量报道[5]。

草食家畜牛羊肉是优质蛋白质来源，胆固醇含量低，且富含许多人体必需氨基酸及其他重要矿物质。牛肉中富含猪、禽肉无法相比的共轭亚油酸、肉毒碱、肌氨酸、生物氢化中间体等功能成分，在减少脂肪摄入、预防糖尿病、癌症和心血管疾病方面对人体健康表现出积极功效。我国草食家畜乳肉功能性产品近年来也有一些报道。例如，以鲜嫩清香、无腥膻味而闻名的国家地理标志产品“柏籽羊肉”，是一种高蛋白、低脂肪且富含游离氨基酸和多种微量元素的优质山羊肉。此外，初乳由于其富含免疫球蛋白、乳铁蛋白和细胞因子等增强机体免疫功能和促进生长发育的生物活性物质，被认为是一种极具潜力的功能性食品。目前，我国草食家畜乳肉功能性产品的研发尚处于起步阶段（第一阶段产品）；随着国人健康意识的提高和功能性食品市场的挖掘，瞄准第三阶段功能性食品特征开展草食家畜乳肉功能性产品的精细研发，提升产品科技内涵对于指导草食家畜生产和居民科学膳食均具有极其重要的战略意义。

2 草食畜牧业乳肉功能性产品发展过程中的前沿科学和技术问题

草食家畜乳肉功能性产品研究总体目标。通过在草食家畜乳肉功能性产品的“靶点解析—动物生产—人体健康”3个层面开展科技创新，解析乳肉产品重要功能成分形成机理，构建草食家畜乳肉功能成分靶向提升技术，并阐明乳肉营养与人体健康的关系，为指导精准日粮设计和开展个性化的第三阶段草食家畜乳肉功能性产品研发提供基础理论支撑，其主要研究战略如图1所示。

草食家畜乳肉产品功能形成理论问题。主要围绕草食家畜的生物学基础和营养过程调控2个方面。① 从自身生物学基础角度，需阐明草食家畜乳肉产品重要功能成分（如生鲜肉共轭亚油酸、肉毒碱和肌氨酸等；生鲜乳乳铁蛋白和卵磷脂等）的遗传基础，解析表征乳肉重要功能成分及其前体物的关键靶基因等。② 从营养过程调控角度，需阐明草食家畜发育

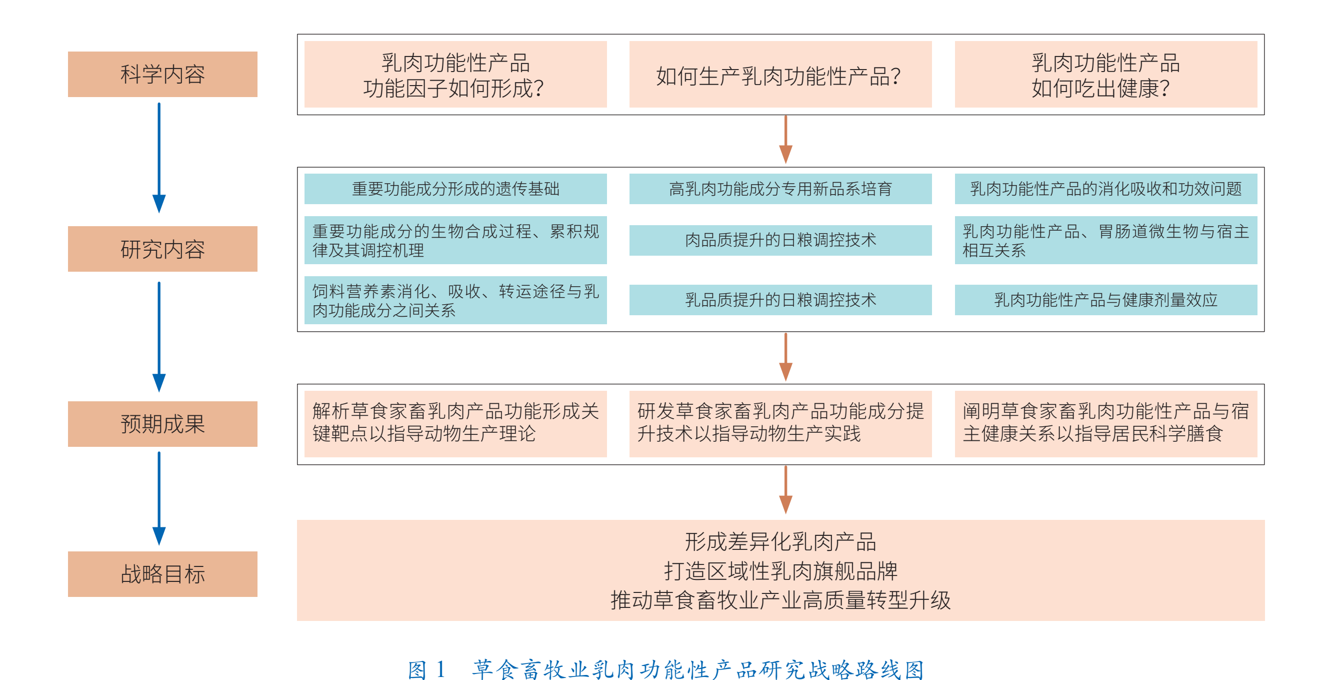


图1 草食畜牧业乳肉功能性产品研究战略路线图
Figure 1 Strategic research roadmap on functional milk and meat products from herbivorous animal husbandry

过程中重要功能成分的化学结构、生物合成过程及其前体物累积规律、阈值范围、影响因素及其调控机理等；解析饲料关键营养素（如碳水化合物、蛋白和脂类）消化、吸收、转运途径及分配等如何调控乳肉产品的品质与功能。以脂肪代谢为例：因大部分不饱和脂肪酸会被食草家畜瘤胃中的微生物氢化为饱和脂肪酸，所以需明确瘤胃内不饱和脂肪酸氢化与乳肉产品中共轭亚油酸生成的关系是什么等。

基于乳肉产品功能成分提升的动物生产技术问题。草食家畜生产环节的主要问题是，如何通过生物和非生物技术，在保障乳肉产品产量和品质的基础上改善其功能成分。① 对于生鲜肉，通常用肌肉 pH 值、肉色、系水力、嫩度、肌间脂肪含量、硫代巴比妥酸反应物值和风味评分等指标来量化评定肉品质量。从生鲜肉功能成分角度出发，草食家畜养殖需要关注的问题包括：在环境友好基础上，如何利用日粮氨基酸平衡、日粮阴阳离子平衡、日粮能氮释放同步化指数和功能性绿色添加剂等技术提升肉产品支链氨基酸、磷脂、共轭亚油酸、生物氢化中间体、肌氨酸和肉毒碱等重要功能成分含量；功能性调控剂的适宜添加形式、添加量与生产成本和动物耐受剂量研究等。② 对于生鲜乳，我国已制定严格的生产和质量标准，对生鲜乳乳脂率、乳蛋白和非脂乳固体等指标做了严格的阈值限定。在满足行业标准基础上，如何提升生鲜乳重要功能成分（如卵磷脂、共轭亚油酸、乳铁蛋白）含量，以及生鲜乳调控剂的剂量效应与生产成本等是奶用草食家畜养殖层面需要关注的问题。

草食家畜乳肉功能成分与人类健康的理论基础问题。主要包括：乳肉重要功能成分在人体内的消化吸收和功效问题，明确乳肉产品的功能型分类；不同年龄阶段人群摄入草食家畜乳肉功能成分后，机体免疫系统、肝脏、胃肠道及其微生物等组织器官如何响应；功能成分摄入量与人体生理过程的量效关系和时空效应如何；根据草食家畜乳肉产品功能成分含量，制定不同生理阶段与不同健康水平人群的膳食方案等。

3 发展草食畜牧业乳肉功能性产品的实践探索

3.1 利用遗传改良方法培育新品系

家畜优秀遗传背景是形成良种的基础。通过品种选育或基因工程方法培育重要功能成分基因高表达的家畜品种是生产富含特定功能成分功能性动物产品的有效途径。例如，乳铁蛋白是可以从牛奶中提取获得的核心营养蛋白质，对人体健康具有调节免疫和促骨生长等多种保健功能。国内外科研人员利用体细胞克隆技术获得人乳铁蛋白基因，培育人乳铁蛋白克隆奶牛，提高了生鲜乳中重组人乳铁蛋白含量[6]。高肌间脂肪是牛羊肉大理石纹生成的基础，也是影响肉品质重要因素之一。肌间脂肪的沉积与草食家畜的品种、管理、营养和遗传基础密切相关。中国科学院生态草牧业畜牧科研团队前期明确了影响绵羊肌间脂肪沉积的相关基因，筛选构建了以我国绵羊品种为基础的肉质性状基因筛选芯片，以生产高品质羊肉为目标，利用良种选育联合育种技术正在开展具有高肌间脂肪的雪花羊肉新品系选育工作。此外，草食家畜乳肉产品含有可改善心血管健康、代谢疾病和神经健康的磷脂，尤其是牛羊肉中含有较高浓度的可增长人类肌肉和增强力量的肌氨酸和肉毒碱。虽然这些功能成分是草食家畜乳肉产品异于猪禽肉产品重要的功能成分，但目前关注较少。通过剖析影响草食家畜乳肉产品中磷脂、肌氨酸、肉毒碱等重要功能成分主控基因，利用遗传改良方法培育磷脂、肌氨酸或肉毒碱高表达本土草食家畜种源，是实现乳肉产品功能化的发展方向。

3.2 调控日粮配方改变功能成分合成过程

由于草食家畜具有迥异于单胃动物的消化器官——瘤胃，使得关键营养素在动物机体内表现出特

有的消化代谢机制。例如：在瘤胃微生物发酵作用下，包括粗纤维等在内的碳水化合物降解生成短链脂肪酸以作为动物主要能量来源，蛋白质降解为氨氮并进一步生成含各种必需氨基酸的微生物蛋白质，脂肪中不饱和脂肪酸氢化生成饱和脂肪酸等。国内外科研人员从草食家畜营养代谢过程角度调控乳肉产品重要功能成分已进行了多年研究探索，其中以共轭亚油酸研究最多。草食家畜乳肉产品中含有较高的共轭亚油酸，在减少脂肪摄入、预防糖尿病、癌症和心血管疾病方面对人体健康有着积极作用。研究表明可通过提高草食家畜日粮粗饲料比例、改变脂肪酸种类和数量等方法来改善乳肉共轭亚油酸含量[7,8]。中国科学院生态草牧业畜牧科研团队前期在应用植物功能成分调控草食畜产品品质的研究中发现，在肉羊日粮中添加 3.0—4.0 g/kg 儿茶素可有效改善肉羊肌肉品质，提升肌肉中不饱和脂肪酸的比例[9]；在泌乳羊日粮中增加单宁，羊乳中单不饱和脂肪酸及多不饱和脂肪酸含量随日粮中单宁添加量增加而线性增加[10]。目前，通过日粮调控方法改善草食家畜乳肉产品中磷脂、肌氨酸和肉毒碱等重要功能成分研究较少，基于其在草食家畜乳肉产品和人类营养中的重要性，需要加强针对这些重要功能成分的靶向日粮配制技术和功能型饲料产品研发。

3.3 靶向合成草食家畜乳肉功能成分前体物质

近年来，合成生物学在改造微生物的遗传物质和代谢途径方面已经取得了令人瞩目的进展。DNA 序列的从头设计合成能力已经从单纯的某个基因发展到整个微生物的基因组，病毒、原核生物基因组及真核生物染色体相继被成功合成。伴随合成生物学技术的不断突破，研究人员已经能够在特定微生物宿主体内引入复杂的外源代谢途径并进行工程化改造，实现定向进化。对于草食家畜而言，瘤胃内栖息着复杂多样的微生物，包括细菌、真菌、古菌和原虫等，具有种类多样性和功能复杂性，可以作为各种功能性成分（如氨基酸、脂肪酸、维生素）的天然资源库。基于合成生物学，挖掘草食家畜功能成分前体物质的合成途径，在瘤胃模式微生物中构建相应的合成通路；并将经过功能验证的功能成分前体物质代谢途径按照功能簇的形式进行组合合成；通过高效合成元件的挖掘、增加关键限速酶的拷贝数和引入分子调控线路等手段实现合成网络的组合优化。靶向改造草食家畜瘤胃特定微生物以合成功能成分前体物质，促进草食家畜功能性肉品质（支链脂肪酸和风味氨基酸等）和乳成分（共轭亚油酸、磷脂和乳铁蛋白等）合成与沉积，在提升草食家畜乳肉产品质量方面的应用潜力巨大，亟待挖掘。

4 政策建议

草食畜牧业乳肉功能性产品发展还处于摸索阶段，在国家战略层面围绕草食家畜乳肉功能性产品开展重大基础研究、重大技术攻关和重大产品开发，对形成差异化草食畜牧业乳肉产品，打造旗舰乳肉品牌，并推动我国草食畜牧业走高质量发展道路和引导消费者健康膳食具有重要的战略意义。对于草食畜牧业的高质量发展，提出 2 点政策建议。

（1）*完善组织管理*。需进一步强化顶层设计，统筹草食畜牧业功能产品技术和产品研发的相关科技资源。积极主动与国内外顶尖学术机构和科学家建立起紧密的合作关系，形成科研共同体，发挥主动权和话语权，抢占若干领域制高点，并组建一支顶尖的学术队伍，建立一批顶尖的学术科研平台。

（2）*加强研究投入*。在国家战略层面各级政府发挥在政策制定中的引导作用，针对不同区域和不同人群消费需求，围绕草食畜牧业功能性产品发展产业链部署重大科技任务，加大政府投入用于基础研究，并引导企业和社会资本投入草食家畜乳肉功能性产品的技术研发和产品开发。

参考文献

1 王一鸣. 扩大中等收入群体是构建新发展格局的重要途径. 金融论坛, 2020, 25(12): 3-9.

2 陈伟生, 关龙, 黄瑞林, 等. 论我国畜牧业可持续发展. 中国科学院院刊, 2019, 34(2): 135-144.

3 国家统计局. 中国统计年鉴2020. 北京: 中国统计出版社, 2020.

4 赵其国, 尹雪斌. 功能农业. 北京: 科学出版社, 2016.

5 张敏, 张海军, 王晶, 等. 功能性蛋的研究进展与展望. 粮食与食品工业, 2020, 27(1): 43-47.

6 Vàzquez-Salat N. Are good ideas enough? The impact of socio-economic and regulatory factors on GMO commercialization. Biological Research, 2013, 46(4): 317-322.

7 Daley C A, Abbott A, Doyle P S, et al. A review of fatty acid profiles and antioxidant content in grass-fed and grain-fed beef. Nutrition Journal, 2010, 9(1): 1-12.

8 Vahmani P, Ponnampalam E N, Kraft J, et al. Bioactivity and health effects of ruminant meat lipids. Invited review. Meat Science, 2020, 165: 108114.

9 Tan C Y, Zhong R Z, Tan Z L, et al. Dietary inclusion of tea catechins changes fatty acid composition of muscle in goats. Lipids, 2011, 46(3): 239-247.

10 Abo-Donia F M, Yang L Y, Hristov A N, et al. Effects of tannins on the fatty acid profiles of rumen fluids and milk from lactating goats fed a total mixed ration containing rapeseed oil. Livestock Science, 2017, 204: 16-24.

Developing Strategies of Functional Milk and Meat Products from Herbivorous Animal Husbandry

HE Zhixiong[1,2] ZHOU Chuanshe[1,2] WANG Min[1] YANG Guo[3] ZHONG Rongzhen[4] JIAO Jinzhen[1] TANG Shaoxun[1] TAN Zhiliang[1,2*]

（1 CAS Key Laboratory for Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;

2 College of Advanced Agricultural Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

4 Jilin Provincial Key Laboratory of Grassland Farming, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China）

Abstract In the past 40 years, the animal husbandry industry in China has been developed very fast through the technological and social development. It has been changed into a new stage from quantity to quality of the animal products, and more attention has been paid on the healthy food. The functional animal products will be an important breakthrough for the high-quality development of animal husbandry. This paper reviews the current animal husbandry industry and functional products of herbivorous animal husbandry in China and abroad. Several key scientific and technological issues on functional milk and meat are analyzed. Practical exploration including biotechnology (genetic breeding and biosynthesis) and non-biotechnology (feeding technology) on how to develop the production of functional milk and meat is proposed. It is expected that we can study and consolidate the regulation theory and technology of functional milk and meat of herbivorous animal husbandry by supports from the national strategic level. It will be significantly important to guide

*Corresponding author

the sustainable development of herbivorous livestock and human diet consumption, and to build the domestic flagship brand of milk and meat products in China.

Keywords herbivorous animal husbandry, functional products, milk and meat brand, practical exploration



贺志雄 中国科学院亚热带农业生态研究所研究员。主要从事母体和幼龄草食动物营养生理研究，以及牛羊肉育肥、肉品质调控、幼畜优化培育技术等方面的科技示范工作。近年来主持国家自然科学基金面上项目、中国科学院人才择优项目、中国科学院科技服务网络计划（STS）重点项目等科研项目。在畜牧学主流期刊发表SCI论文50余篇。E-mail: zxhe@isa.ac.cn

HE Zhixiong Ph.D., Professor, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on the nutritional physiology of maternal and young ruminants. He has experience of working on ruminants fattening, meat quality control, and feeding technology of young animals. In recent years, he has led several major projects with sponsorship from National Natural Science Foundation of China, Talent Projects of CAS, and STS Key Projects. More than 50 SCI indexed papers have been published in high quality journals in animal science area. E-mail: zxhe@isa.ac.cn



谭支良 中国科学院亚热带农业生态研究所所长、研究员。科学技术部重点领域“畜禽消化道健康与养殖生态安全”创新团队首席科学家，湖南省现代农业草食动物产业技术体系首席科学家，中国畜牧兽医学会动物营养学分会副理事长。曾获国家科技进步奖二等奖2项，湖南省科技进步奖一等奖4项。先后主持湖南省重大科技专项、科学技术部国际合作项目、国家自然科学基金重大国际（地区）合作项目和重点项目等30余项，发表SCI论文150余篇。E-mail: zltan@isa.ac.cn

TAN Zhiliang Director and Ph.D. Supervisor of Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences (CAS), Principal Scientist of the Innovation Team of “Livestock Gut Health and Ecological Breeding” in the key field of Ministry of Science and Technology, Principal Scientist of Hunan Modern Agricultural Herbivore Industry System, and Vice Chairman of Animal Nutrition Branch of Chinese Society of Animal Husbandry and Veterinary. He has received 2 second prizes of National Science and Technology Advancement Award and 4 first prizes of Hunan Science and Technology Advancement Award. He has led more than 30 research projects including Hunan Major Science and Technology Projects, International Cooperation Projects of the Ministry of Science and Technology, Major International Cooperation Projects and Key Projects of National Natural Science Foundation of China, etc. He has published more than 150 SCI indexed papers. E-mail: zltan@isa.ac.cn

■责任编辑：张帆